

## КОРОНА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

## The Solar Corona in the Light of TRACE Observations

**Abstract.** EUV Sun observations with high spatial resolution ( $\sim 1''$ ) by the orbital telescope TRACE show that the solar corona can be interpreted as plasma trapped and heated by the solar closed magnetic fields and arranged in form of coronal arches and loops. The crucial question is how and whence plasma and energy for corona creation and heating are transported. Arguments are presented that material and energy for corona are carried by the permanent high velocity plasma flows from photosphere, responsible also for the stationary fast and slow solar winds.

## Вступление

Исследование выполнено по результатам наблюдений TRACE, опубликованным в различных журналах. Телескоп TRACE (Transition Region And Corona Explorer) с высоким разрешением  $\sim 1''25$ , в 5 раз превосходящим разрешение EIT/SOHO, функционировал на околоземной орбите с апреля 1998 по 21 июня 2010 г. Главной задачей миссии TRACE было изучение структуры и температурных режимов излучающей короны в трёх EUV-линиях:  $171 \text{ \AA}$  – FeX (0.7–1.0 K),  $195 \text{ \AA}$  – FeXII ( $\sim 1.5$  K) и FeXV ( $\sim 2.0$  K). Наблюдения проводились в эпоху максимума активности (23-го солнечного цикла), когда структурные образования излучающей короны – активные области – в изобилии присутствовали на Солнце. Далее обсуждаются основные результаты наблюдений.

## Структура и температура короны по наблюдениям TRACE

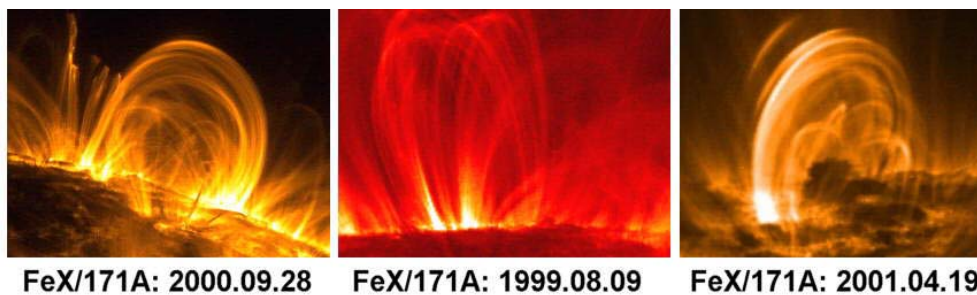


Рис. 1: Корональные петли в линии  $\lambda 171 \text{ \AA}$  FeX (0.7-1.0)MK – TRACE (Интернет).

Вся плазма, ответственная за излучение  $\lambda 171 \text{ \AA}$ , сконцентрирована в виде ансамблей тончайших по сравнению с их длиной арочных и петельных образований. Диффузная

среда отсутствует. Диаметр и яркость петель не зависят от их высоты – гидростатика не работает. Петли изотермичны по всей их длине. При всём разнообразии форм петли спокойной короны не имеют разрывов, что свидетельствует об их магнитоплазменной природе (Schrijver C.J. et al., Solar Phys., 1999, **187**, 261; Aschwanden M. et al. ApJ, 2000, **541**, 1059; Aschwanden M. & Nightingale R., ApJ, 2005, **633**, 499).

На Рис. 2 представлены два примера монотермичных арок разной температуры в проекции на картинную плоскость для одних и тех же участков лимба по наблюдениям SDO.

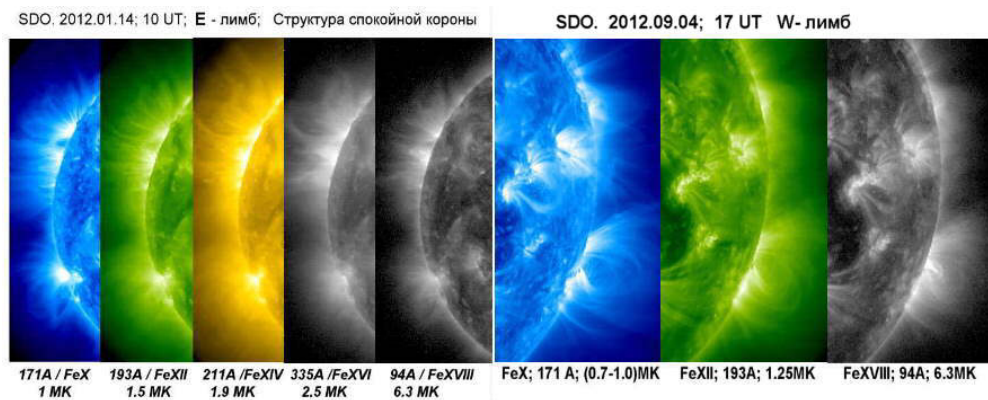


Рис. 2: Монотемпературные составляющие политемпературных петель на лимбе-SDO. Между крайними изображениями на обоих кадрах  $\Delta T \approx 1 - 6$  МК.

Монохроматические образования короны над лимбом (разнотемпературные петли) демонстрируют пространственную идентичность по всей их длине. Наблюдаемые картины пространственной моно- и политемперичности корональных петель можно объяснить только их сверхтонкой пространственной субструктурой в виде «связок» большого числа вытянутых по всей длине петель тончайших изотермичных нитей («жил») с различными температурой и плотностью плазмы. Из-за недостаточного пространственного разрешения телескопа в каждой точке монотемпературной петли измеряется суммарная яркость от всех монохроматических жил данной температуры на луче зрения и в плоскости изображения. Эта не разрешаемая телескопом сверхтонкая политемперичность петель объясняет, почему изображения одной и той же петли в свете разнотемпературных ионов выглядят идентичными (Schrijver C.J. et al., Solar Phys., 1999, **187**, 261; Aschwanden M. et al., ApJ, 2000, **541**, 1059; Aschwanden M. & Nightingale R., ApJ, 2005, **633**, 499).

## Магнитные поля Солнца – главный коронообразующий фактор

Едва ли можно сомневаться в том, что мультижильная структура корональных петель – следствие вмешательства солнечных магнитных полей в плазменные процессы в СК. Уже достаточно давно, с появлением рентгеновской телескопии Солнца, исследователи обратили внимание на связь пространственной структуры и температуры СК с магнитными полями Солнца. «Корона образуется только над теми областями Солнца, где наблюдаются замкнутые магнитные поля (ЗМП): **есть ЗМП – есть корона, нет**

**ЗМП – нет короны»** (Litwin C. & Rosner, R., ApJ, 1993, **412**, 375). МПС играют ключевую роль в формировании короны – они создают каркас короны в виде магнитных арок и петель (Schrijver C.J. et al., Solar Phys., 1999, **187**, 261; Aschwanden M. et al. ApJ, 2000, 541, 1059; Aschwanden M. & Nitta N., ApJ, 2000, **535**, L59).

Некоторые исследователи считают, что роль МП Солнца ограничивается удержанием плазмы в пределах корональных петель (Real F. et al., ApJ, 2000, **535**, 412). Существуют, однако, наблюдательные свидетельства участия МПС в процессах нагрева короны (Aschwanden M. & Nitta N., ApJ., 2000, **535**, L59). Визуально наиболее горячие области короны, всегда располагаются в структурах с наибольшими напряжённостями МП.

Магнитные конфигурации, способные захватить плазму и удерживать её в ограниченном объёме, называются магнитными ловушками. **Магнитный каркас СК, таким образом, можно рассматривать как совокупность «укоренённых» в фотосфере магнитных ловушек. Очевидно, что захват и остановка направленных потоков плазмы должны сопровождаться выделением тепла.**

## О механизме нагрева короны

Согласно наблюдениям TRACE, нагрев включается резко, по-видимому, в самом начале вспышки на поверхность фотосферы ЗМП, и остаётся постоянным в течение всей фазы роста петли (Real F. et al., ApJ, 2000, **535**, 412; 423). Нагрев начинается в основаниях петель. Разные ветви одной петли могут нагреваться с различной скоростью. Весь процесс – формирование и нагрев петли – занимает несколько десятков минут (Real F. et al., ApJ, 2000, **535**, 423), после чего устанавливается режим равновесия. Накачка плазмы в петли и её нагрев должны продолжаться в течение всего времени жизни магнитной петли.

Захват плазмы и ее нагрев происходят избирательно (Real F. et al., ApJ, 2000, **535**, 423; Zhang J. et al., ApJ, 1999, **527**, 977) – только в магнитных ловушках. Горячие корональные петли формируются в любом месте солнечной поверхности, где всплывают замкнутые магнитные структуры. **Этот наблюдательный факт свидетельствует о том, что нагревающий корону поток энергии поступает перманентно и распределён равномерно по поверхности фотосферы, но диссипирует в высшей степени локально – только в петлях замкнутых МП (Litwin C., & Rosner R., ApJ, 1993, 412, 375; Zhang J. et al., ApJ, 1999, 527, 977), как это представлено на схеме на Рис. 3.**

С помощью какого носителя плазма и энергия для её нагрева поступают в корону? Вопрос об источниках плазмы практически не обсуждается, хотя он не менее важен.

В качестве исходного материала для формирования короны в работе (Real F. et al., ApJ, 2000, **535**, 423) рассматривается возможное существование на корональных высотах петель с холодной ( $T \leq 10^5$  K) плазмой. Признаки присутствия в корональном пространстве медленно движущейся вниз диффузной плазмы с температурой переходного слоя ( $T \leq 7 \times 10^5$  K) действительно обнаружены в EUV-спектрах Солнца (Seely J.F. & Feldman U. et al., ApJ, 1997, **489**, L87), но связываются с опусканием охлаждающейся материи корональных петель.

Наиболее перспективной представляется доставка энергии и вещества в корону по-

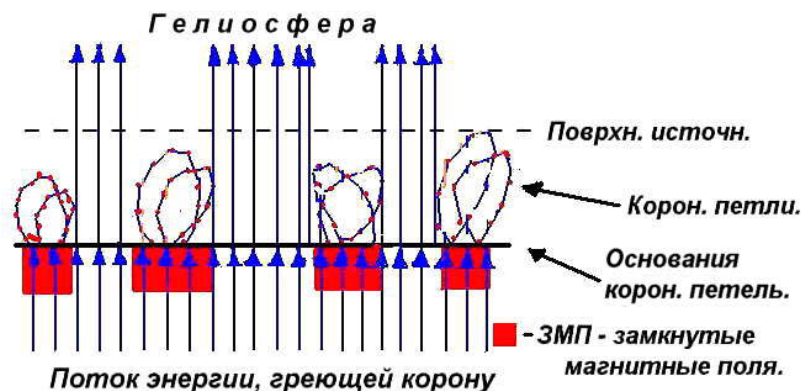


Рис. 3: Прохождение потоков энергии через корональное пространство. Корона образуется только над теми областями Солнца, где наблюдаются ЗМП (Litwin C., & Rosner R., ApJ, 1993, 412, 375). Если ЗМП отсутствуют, потоки энергии уходят в гелиосферу.

средством высокоскоростных ( $V \sim 1000$  км/с) потоков плазмы. Такая возможность рассматривалась кратко в работе (Schrijver C.J. et al., Solar Phys., 1999, 187, 261) в связи с наблюдениями TRACE. На высотах в несколько тысяч км помимо движущихся вверх потоков корональной материи были обнаружены восходящие «холодные» ( $\leq 20000$  K) потоки, диссипация которых могла бы обеспечить и плазму и энергию для образования короны. Но авторы не увидели возможности для диссипации этих потоков. И потому идея не имела развития, как нам кажется, по недоразумению. Данные о скоростях этих потоков в работе (Schrijver C.J. et al., Solar Phys., 1999, 187, 261), к сожалению, не приводятся.

## Магнитные поля Солнца и солнечный ветер. Первичные высокоскоростные потоки плазмы

Существование родственной связи солнечной короны с потоками солнечного ветра (СВ) уже достаточно давно обсуждается в связи с наблюдениями Ulysses/SWOOPS на первом обороте КА вокруг Солнца (Рис. 4, панель «а») (Никольская К.И. и Вальчук Т.Е., Препринт, 1995, (1079) ИЗМИРАН, 16 с.). Здесь концепция «нет ЗМП – нет короны» получает дальнейшее развитие.

На Рис. 4, заимствованном из (McComas D.J. et al., Geophys. Res. Lett., 2008, 35, L18103, doi:10.1029/2008GL034896), обобщены результаты измерений скоростей солнечного ветра (СВ) в рамках проекта Ulysses/ SWOOPS за время его трёх оборотов вокруг Солнца по квазимеридиональной орбите с января 1991 г. по 20 июня 2009 г.

Измерения Ulysses/SWOOPS выявили крайне важные для понимания природы СВ свойства потоков солнечной плазмы, недоступные околоземным КА. Это – зависимость гелиоширотного распределения скоростей потоков от фаз цикла активности (Рис. 4) и зависимость скоростей СВ от магнитных полей на поверхности Солнца, свидетельствующие о непосредственном контакте потоков СВ с солнечными магнитными полями. Оказалось, что в эпохи минимума в гелиосфере вне пояса стримеров наблюдаются только высокоскоростные потоки СВ со скоростями 700–800 км/с. Эти потоки СВ

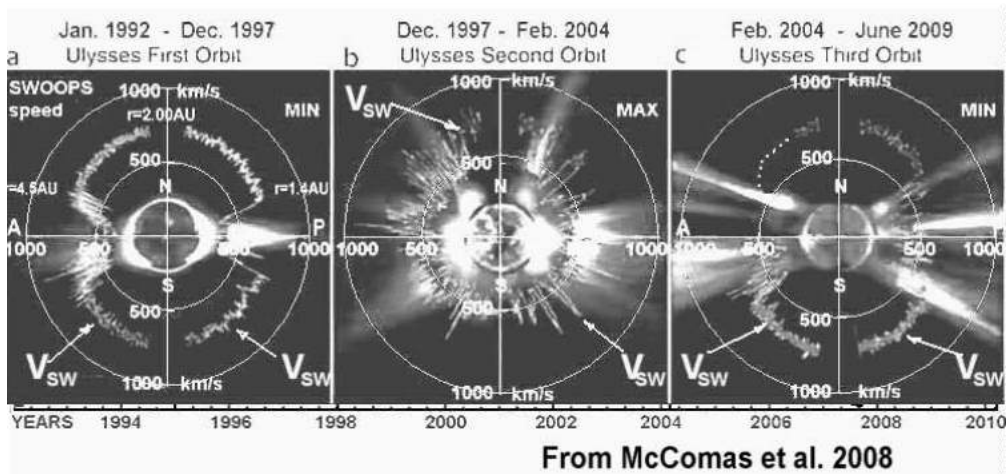


Рис. 4: Радиальные скорости СВ в зависимости от гелиографической широты  $V(\alpha)$  представлены в виде трёх полярных диаграмм «а», «b» и «с» для трёх оборотов Ulysses вокруг Солнца. Первая и третья диаграммы («а» и «с») относятся к фазам минимума 22 и 23 циклов соответственно, диаграмма «b» – к фазе максимума активности 23-го цикла. В центре каждой диаграммы – изображение короны FeXII EIT/SOHO, сплошные белые пятна – корональные стримеры (LASCO-2). Треки скоростей СВ отмечены символами  $V_{SW}$  со стрелочками. Белые концентрические окружности задают шкалу скоростей, 1000 и 500 км/с. На каждой панели перигелий (P,  $r \sim 1.24$  а.е.) – справа, афелий (A,  $r \sim 5$  а.е.) – слева. Горизонтальная белая черта – солнечный экватор. N и S – гелиографические полюса.

приходят из областей Солнца, где замкнутые магнитные поля (ЗМП), способные образовать корону, отсутствуют. В пределах пояса стримеров с его замкнутыми магнитными полями доминирует медленный СВ со скоростями  $V < 500$  км/с. Характер зависимости скорости потоков СВ от МП Солнца: ЗМП – медленный СВ, нет ЗМП – быстрый СВ – несомненный признак торможения СВ в замкнутых магнитных структурах, что возможно только при непосредственном прохождении потоков плазмы через МП Солнца, локализующиеся между поверхностью фотосферы и поверхностью источника (схема на Рис. 5).



Рис. 5:

Очевидно также (Рис. 5), что потоки СВ со скоростями 700–800 км/с будут наблюдаться в гелиосфере только при условии, если высокоскоростные потоки плазмы со скоростями  $> 800$  км/с непрерывно инжектируются в основания ЗМП. Поскольку пото-

Таблица 1: Основные характеристики потоков энергии, нагревающих корону, по наблюдениям in situ короны (TRACE) и солнечного ветра (Ulysses)

	Гипотетические потоки энергии, нагревающие корону (наблюдения TRACE)	Первичные высокоскоростные потоки (ПВП), наблюдающиеся в гелиосфере как СВ $\sim 700\text{--}800$ км/с (на основании данных Ulysses)
Поступление и локализация энергии	Энергия поступает в корону снизу, перманентно и равномерно по всей поверхности фотосферы	Энергия поступает в корону снизу, перманентно и равномерно по всей поверхности фотосферы
Вид энергии	???	Кинетическая энергия высокоскоростных ( $\sim 800$ км/с) потоков плазмы
Области диссипации	Только в пределах ЗМП АО и пояса стримеров	Только в пределах ЗМП АО и пояса стримеров
Результат	Нагрев короны	Формирование и нагрев короны + медленный СВ ( $V < 500$ км/с)

ки СВ со скоростями 700–800 км/с наблюдаются в гелиосфере, мы имеем полное право утверждать, что

**первичные высокоскоростные потоки, ответственные за СВ  
– не гипотеза, а реальное явление.**

Начальная скорость ПВП с учетом потерь на преодоление гравитации  $V_0$  и исходная концентрация протонов  $N_p^0$  в первичных потоках с учётом энергетических потерь короны оцениваются как  $V_0 \approx 900$  км/с и  $N_p^0 \approx 3 \times 10^5\text{--}3 \times 10^6$  см $^{-3}$  (Могилевский Э.И. и Никольская К.И., Геомагн. и аэрон., 2010, **50**, 159; Mogilevsky E.I., Nikolskaya K.I., *Astrophys. and Space Sci. Proc.*, 2011, **30**, 189).

Таблица 1 чётко показывает, что гипотетические потоки энергии, ответственные за нагрев короны, однозначно идентифицируются с первичными высокоскоростными потоками плазмы, ответственными также за образование солнечного ветра (Могилевский Э.И. и Никольская К.И., Геомагн. и аэрон., 2010, **50**, № 26, 159; Mogilevsky & Nikolskaya, *Astrophys. and Space Sci. Proc.*, 2012, 30, 189). ПВП приносят в корону вещество и энергию в виде кинетической энергии потоков, диссипирующих с выделением тепла в магнитных ловушках.

Таким образом, солнечная корона и солнечный ветер суть не что иное, как общий результат единого процесса – взаимодействия с магнитными полями Солнца первичных высокоскоростных потоков плазмы: корона – это ПВП плазмы, захваченные и разогреты в магнитных ловушках, СВ – ПВП, покинувшие Солнце (Рис. 6).



Рис. 6:

## О природе первичных высокоскоростных потоков солнечной плазмы: Откуда ПВП?

Анализ наблюдений солнечной короны с телескопом TRACE и наблюдений солнечного ветра Ulysses/SWOOPS приводит к заключению о присутствии в основаниях локальных замкнутых магнитных полей Солнца перманентных высокоскоростных истечений плазмы, из которых, как было показано выше, формируются корона и солнечный ветер.

Между фотосферой и короной располагается хромосфера. Многочисленные попытки получить стационарные высокоскоростные потоки СВ ускорением хромосферного вещества оказались неудачными. Существуют, однако, наблюдательные аргументы в пользу фотосферного происхождения ПВП.

Это, во-первых, **высокая стабильность скоростей СВ в гелиосфере вне пояса стримеров в эпохи минимумов 22 и 23 циклов, 700–800 км/с (Рис. 4а и с)**, которую может обеспечить только фотосфера – мощный стабильный источник плазмы и энергии. Выше было показано, что причина колебаний скоростей СВ – солнечные магнитные поля, природа которых меняется в течение циклов. В минимумах активности вне пояса стримеров наблюдаются МП двойкой природы – открытые МП полярных корональных дыр (КД) ( $\varphi \geq \pm 70^\circ$ ) и поля магнитной сетки с редкими корональными петлями – между ПКД и поясом стримеров, одинаково ответственные за наблюдающиеся флуктуации скоростей СВ 700–800 км/с. Эту картину дополняет КД, образовавшаяся в максимуме активности 23 цикла между двумя стримерами на северном полюсе Солнца, с теми же вариации скоростей текущего из нее СВ – 700–800 км/с (Рис. 4б). Солнце без АО и пояса стримеров превратится в источник только высокоскоростных потоков СВ со скоростями  $\sim 800$  км/с по всем направлениям.

Другой аргумент в пользу фотосферного происхождения ПВП – результаты измерений химического состава плазмы потоков СВ. Издавна известно, что в высокотемпературной плазме АО короны относительное содержание химических элементов с низким потенциалом первой ионизации FIP < 10 eV (Al, Mg, Si, Ca, Fe) в 3–4 раза выше по сравнению фотосферным, в то время как обилие элементов с FIP > 10 eV идентично фотосферному. Согласно современным данным (Feldman U., Space Sci. Rev., 1998, **85**, 227; Woo R. et al., ApJ, 2004, **612**, 1171), относительное содержание элементов с низким FIP в плазме медленного стационарного СВ так же, как в короне, превышает фотосферное в 3–4 раза и близко к фотосферному в плазме стационарных высокоскоростных потоков. Последние данные могут быть истолкованы как свидетельство прямой связи высокоскоростного СВ с фотосферой. ПВП извергаются из фотосферы одноразовым

импульсом и движутся радиально по инерции, что подтверждается IPS – наблюдениями скоростей СВ (Могилевский Э.И. и Никольская К.И., Геомагн. и аэрон., 2010, **50**, № 26, 159).

Вопрос о механизме генерации ПВП обсуждался в работе (Могилевский Э.И. и Никольская К.И., Геомагн. и аэрон., 2010, **50**, № 26, 159; Mogilevsky E.I. & Nikolskaya K.I., *Astrophys. and Space Sci. Proc.*, 2012, **30**, 189). Высокоскоростные потоки холодной плазмы типа ПВП, скорости которых не объясняются классической термодинамикой, относятся к явлениям «странного ускорения Ферми». Генерация таких потоков возможна во фрактальной среде. В работе (Milovanov A.V. & Zelenyi L.M., *Phys. Rev. E.*, 2001, **64**, 052101-01) проблема рассматривалась в рамках фрактальной топологии применительно к магнитосфере Земли.

Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн  
имени Н.В. Пушкова РАН  
г. Троицк Московской обл., 142190, Россия  
*knikol@izmiran.troitsk.ru*

К.И. Никольская  
K.I. Nikol'skaya

Поступила 23 января 2013 г.